

УДК 621.921.34-2:622.24.05

А. Н. Исонкин, Г. Д. Ильницкая, канд. техн. наук,  
В. Н. Ткач, д-р физ.-мат. наук, И. Н. Зайцева, мл. науч. сотр.

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины*

## Оценка перспективности использования в буровом породоразрушающем инструменте синтетических алмазов разных ростовых систем

В статье представлены результаты исследования влияния термической обработки алмазов на их физико-механические характеристики и на износостойкость бурового инструмента. Показано, что с увеличением температуры термической обработки алмазов, синтезированных в ростовых системах Ni-Mn-C, Fe-Co-C и Fe-Ni-C, с высоким содержанием внутрикристаллических примесей и включений, наблюдается уменьшение прочности кристаллов алмаза во всем исследуемом диапазоне температур от 700°С до 1100°С. При увеличении температуры термической обработки до 800°С в алмазах с меньшим содержанием внутрикристаллических примесей и включений происходит незначительное повышение прочности за счет снижения внутренних напряжений в кристаллах алмаза. Оснащение бурового инструмента алмазами, предварительно подвергнутыми термической обработке в инертной среде при температуре 800°С, способствует снижению его интенсивности изнашивания на 17–26 %.

Ключевые слова: термическая обработка, буровой инструмент, внутрикристаллические примеси и включения, интенсивность изнашивания, прочность.

### Введение

На современном этапе развитие прогрессивных технологий производства и применения породоразрушающего и металлообрабатывающего инструмента требует использования для его оснащения алмазных шлифпорошков повышенного качества с контролируемыми характеристиками качества по прочности и термостойкости. [1, 2]. Как известно, термостойкость порошков алмазов, как и любых хрупких материалов, характеризуется их способностью выдерживать без разрушения резкие смены температуры [3]. Термостойкость порошков сверхтвердых материалов, в том числе и порошков синтетического алмаза, определяется способностью зерен порошка сохранять прочностные характеристики в результате термической обработки при определенных температурах. На практике оценку термостойкости алмазов принято оценивать коэффициентом термостабильности  $K_{ТС}$  (или термостойкости), который определяют по разработанной методике как отношение показателя прочности при статическом сжатии шлифпорошков после термообработки к показателю прочности при статическом сжатии алмазных зерен до термообработки [4].

Для повышения работоспособности породоразрушающего инструмента необходимо использовать термически прочные шлифпорошки алмазов. Термическая прочность зерен алмазов тесно связана с их термостабильностью. Известно, что термостабильность порошков алмаза взаимосвязана с содержанием внутрикристаллических включений и примесей в кристаллах алмаза [5].

Специфические особенности синтетических алмазов определяются главным образом скоростью роста кристаллов алмаза во время их синтеза, что влияет не только на внешнюю, но и на внутреннюю морфологию кристаллов, в которых количество металлических включений в виде объемных дефектов может достигать нескольких весовых процентов [6]. Объемные дефекты в основном связаны с наличием в кристалле алмаза включений сплава-растворителя и поэтому количественно тесно связаны с удельной магнитной восприимчивостью ( $\chi$ ) [7].

Исследование влияния термической обработки порошков алмаза, полученных в разных ростовых системах, на изменение их физико-механических и эксплуатационных характеристик является актуальной задачей.

Исходя из изложенного, основная цель настоящего исследования – изучить влияние температурной обработки синтетических алмазов, синтезированных в разных ростовых системах, на со-

держание в них внутрикристаллических примесей и включений и их влияние на изменение физико-механических свойств алмазов и работоспособности бурового инструмента.

### Методика эксперимента

Для исследования были выбраны алмазные шлифпорошки зернистостью 400/315 разных марок, синтезированные в системах Ni-Mn-C, Fe-Co-C и Fe-Ni-C. Из этих порошков изготовили образцы, различающиеся между собой по величине удельной магнитной восприимчивости ( $\chi$ ) [7]. Образцы алмазов подвергали термической обработке в инертной среде при температуре от 700 до 1100 °С в течение 15 минут. Перед началом термообработки все образцы подвергались химической обработке для удаления с поверхности зерен алмаза поверхностных примесей.

Содержание и элементный состав включений в образцах алмаза измеряли методом рентгенофлуоресцентного интегрального анализа с использованием растрового электронного микроскопа «BS-340» и энергодисперсного анализатора рентгеновских спектров «Link-860» [8]. Магнитные свойства порошков алмаза в образцах оценивали по удельной магнитной восприимчивости [9]. В порошках определяли механические характеристики: статическую прочность до (P, H) и после температурных обработок (P<sub>то</sub>, H) [10, 11], термостабильность (K<sub>тс</sub>, %) [12].

Порошки алмаза исходные и после температурной обработки использовали для изготовления буровых коронок. Эксплуатационные характеристики бурового инструмента при лабораторных испытаниях определяли в соответствии с методикой изложенной в работе [13].

### Результаты исследования и их обсуждение

В изготовленных для исследования образцах алмаза (№1, №2 и №3), синтезированные в системах Ni-Mn-C, Fe-Co-C и Fe-Ni-C определяли удельную магнитную восприимчивость ( $\chi$ ), прочность (P, H), в общий и элементный состав внутрикристаллических примесей и включений. Результаты определений представлены в табл. 1 и 2.

Табл. 1 – Элементный состав внутрикристаллических примесей и включений в алмазных шлифпорошках разных ростовых систем

№ обр.	Элементный состав, масс %										Общее содержание включений, масс %
	Si	Ca	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Mn	Cu	Zn	
Ni-Mn-C											
1	0,040	0,003	0,003	0,014	0	0,006	0,541	0,471	0,021	0,009	1,108
2	0,046	0,005	0,006	0,018	0,017	0,011	1,136	0,865	0,024	0,010	2,138
3	0,051	0,007	0,009	0,0020	0,037	0,017	1,390	1,00	0,031	0,014	3,017
Fe-Co-C											
1		0,002		0,012	0,254	0,195	0,011		0,005	0,002	0,481
2		0,005	0,006	0,054	0,297	0,239	0,028		0,006	0,002	0,637
3	0,010	0,013	0,016	0,084	0,398	0,341	0,039		0,008	0,003	0,912
Fe-Ni-C											
1		0,015			0,161	0,016	0,114	0,003	0,022		0,331
2		0,026			0,212	0,031	0,124	0,007	0,039		0,439
3		0,040	0,016	0,060	0,222	0,058	0,139	0,010	0,058		0,617

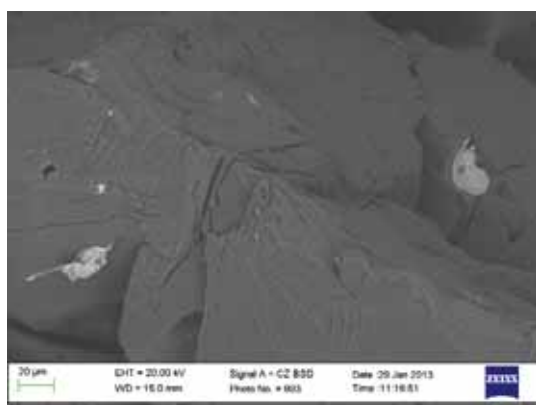
Из таблиц 1, 2 видно, что алмазы, синтезированные в системах Ni-Mn-C, Fe-Co-C и Fe-Ni-C, различаются между собой по содержанию внутрикристаллических примесей и включений, а также по магнитным и прочностным характеристикам. При этом элементы сплава-растворителя преобладают и составляют от 58,5 до 93,6 % от общего количества имеющихся примесей и включений в порошках алмаза этих систем. Приведенные данные подтверждают, что кристаллы алмазов всех систем, содержащие меньшее количество внутрикристаллических примесей и включений, обладают большей прочностью.

Табл. 2 – Физико-механические характеристики алмазов, синтезированных в разных ростовых системах

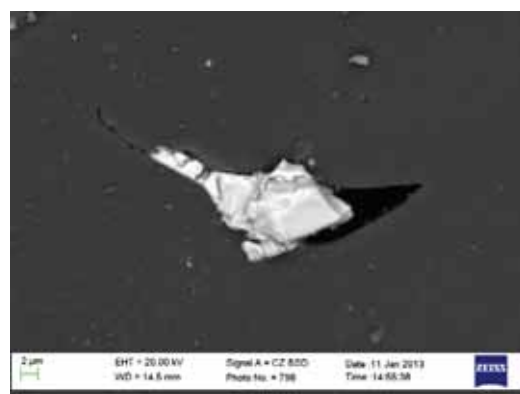
№ образца	Удельная магнитная восприимчивость, $\chi$ ; $10^{-8}$ , м <sup>3</sup> /кг	Статическая прочность Р, Н	Содержание примесей и включений		
			сплава-растворителя		общее, масс. %
			масс. %	%	
Ni-Mn-C					
1	0,8	218,5	1,012	91,3	1,108
2	8,0	130,0	2,001	93,6	2,138
3	24,2	33,8	2,390	79,2	3,017
Fe-Co-C					
1	39,5	230,0	0,449	93,3	0,481
2	61,2	179,0	0,536	84,1	0,637
3	89,6	140,0	0,739	81,1	0,912
Fe-Ni-C					
1	3,2	414,2	0,275	83,0	0,331
2	10,2	358,0	0,336	76,5	0,439
3	24,7	305,5	0,361	58,5	0,617

После проведения термической обработки образцов алмазов №1, №2 и № 3 при разных температурах исследования поверхности их зерен проводили с использованием растровой электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

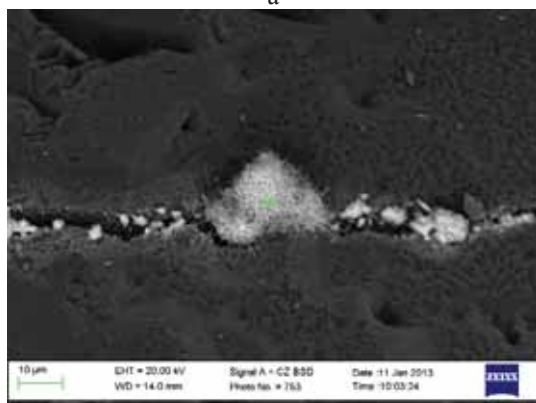
В результате проведенных исследований установили, что после термической обработки на поверхности кристаллов алмаза выплавляются образования включений сплавов растворителей углерода (рис. 1–3). При этом в кристаллах алмазов с большим содержанием включений эти образования появляются при более низких температурах.



а



б



в

Рис. 1. Электронное изображение поверхности алмазов образца № 3, синтезированных в системе Ni-Mn-C, термообработанных при разных температурах: а – 800°C; б – 1000°C; в – 1100°C.

После термической обработки при  $800^{\circ}\text{C}$  на поверхности кристаллов алмаза образца № 3, синтезированных в системе Ni-Mn-C, появляются включения Ni (рис. 1а).

При повышении температуры до  $900^{\circ}\text{C}$  включения Ni появляются и на поверхности алмазов образца № 2, а при  $1000^{\circ}\text{C}$  – на поверхности алмазов образца № 1. При температуре  $1000^{\circ}\text{C}$  на поверхность алмазов образца № 3 выплавляются включения Mn, а при  $1100^{\circ}\text{C}$  (рис. 1б) эти включения Mn образуются в виде тонких усов (рис. 1в).

На поверхности кристаллов алмаза, синтезированных в системе Fe-Co-C, включения в виде FeCo появляются на образце № 3 при обработке после термической обработки при  $900^{\circ}\text{C}$  (рис. 2а), на образце № 2 при  $1000^{\circ}\text{C}$ , а на образце № 1 при  $1100^{\circ}\text{C}$  (рис. 2б).

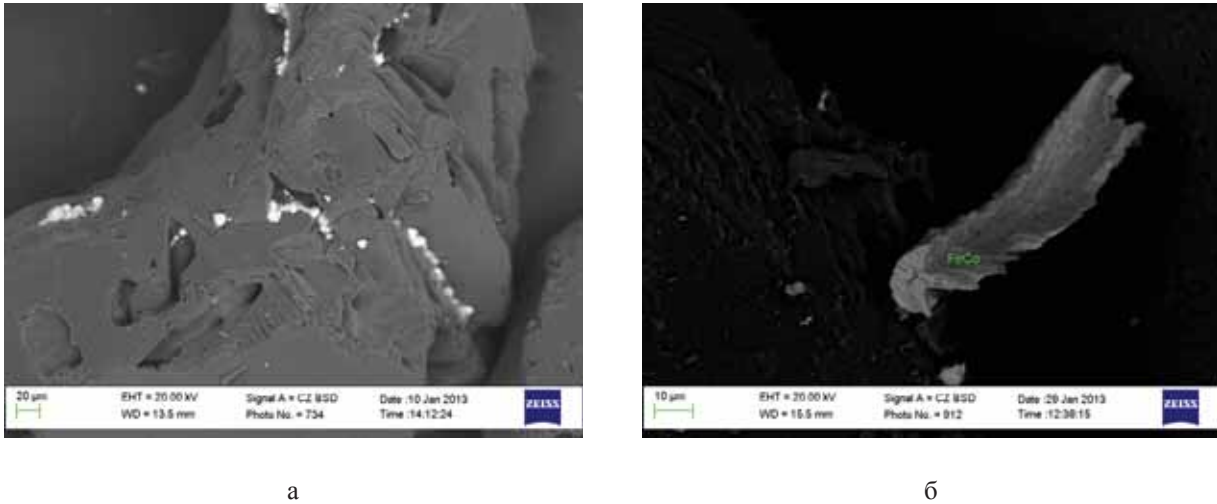


Рис. 2. Электронное изображение поверхности алмазов, синтезированных в системе Fe-Co-C: а – образца № 3 при  $900^{\circ}\text{C}$ , б – образца № 1 при  $1100^{\circ}\text{C}$ .

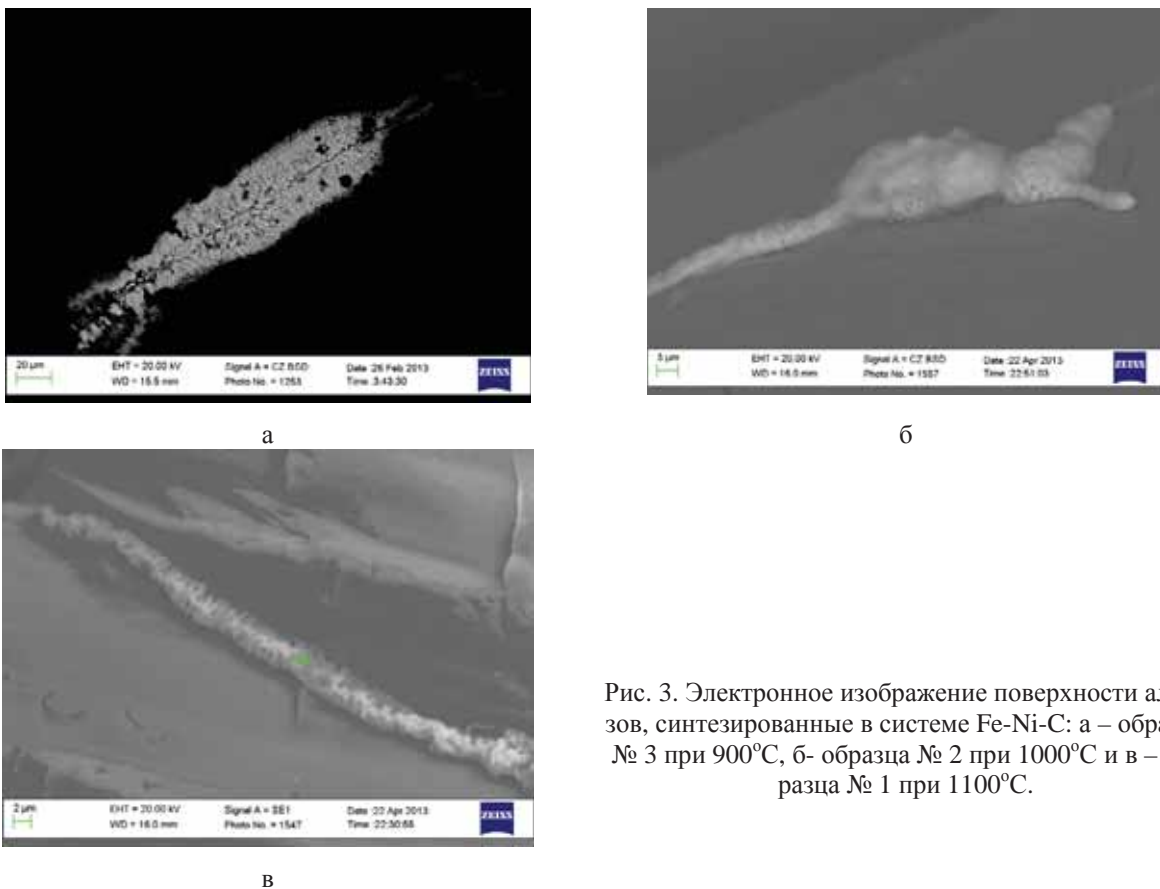


Рис. 3. Электронное изображение поверхности алмазов, синтезированных в системе Fe-Ni-C: а – образца № 3 при  $900^{\circ}\text{C}$ , б- образца № 2 при  $1000^{\circ}\text{C}$  и в – образца № 1 при  $1100^{\circ}\text{C}$ .

В алмазах разных систем после термической обработки определяли статическую прочность и термостабильность. Результаты экспериментов представлены на рис. 4.

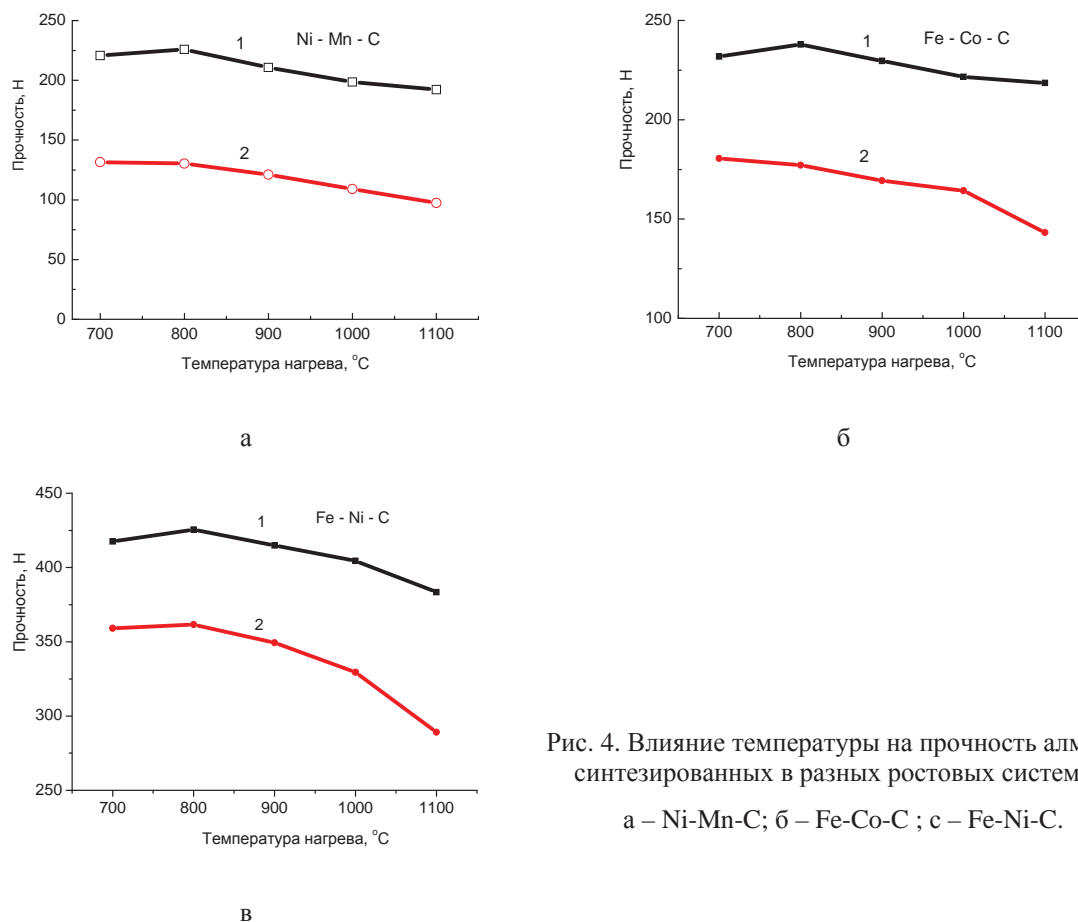


Рис. 4. Влияние температуры на прочность алмазов, синтезированных в разных ростовых системах:

а – Ni-Mn-C; б – Fe-Co-C ; в – Fe-Ni-C.

С увеличением температуры термической обработки в алмазах образцов № 3 всех исследуемых систем с более высоким содержанием внутрикристаллических примесей и включений наблюдали уменьшение прочности кристаллов алмаза во всем исследуемом диапазоне температур от 700 до 1100°C. С учетом этого алмазы образцов №3 в последующих исследованиях не использовали.

При увеличении температуры термической обработки до 800°C в алмазах образцов № 1 и № 2 с меньшим содержанием внутрикристаллических примесей и включений за счет снижения внутренних напряжений в кристаллах алмаза происходит незначительное не более 5 % повышение прочности. Термостабильность алмазов всех исследуемых систем, представленная в виде коэффициента термостабильности, с увеличением содержания в кристаллах алмаза внутрикристаллических примесей и включений, снижается.

Из алмазов образцов № 1 и № 2 всех исследуемых систем с высокой термостабильностью, в которых был установлен эффект повышения прочности при термической обработке при температуре 800°C (исходных порошков и после термической обработки), были изготовлены образцы буровых коронок типа БС-06 диаметром 76 мм..

Лабораторные испытания проводили при бурении коростышеского гранита с частотой вращения 800 мин<sup>-1</sup> и подаче 63 мкм за оборот. Работоспособность буровых коронок оценивали по интенсивности изнашивания коронок ( $I \times 10^{-4}$ , мм/м). В качестве промывной жидкости для удаления шлама разрушенной породы использовалась техническая вода. Интенсивность изнашивания образцов оценивалась как отношение износа алмазонасного слоя коронки к пути трения.

Результаты лабораторных испытаний буровых коронок представлены в таблице 3.

Табл. 3 – Интенсивность изнашивания буровых коронок, оснащенных алмазами с разным содержанием внутрикристаллических примесей и включений

№ образца	Содержание включений и примесей (общее), масс. %	Статическая прочность алмазов, Р, Н		Коэффициент термостабильности, К <sub>ТС</sub> , %	Интенсивность изнашивания, I×10 <sup>-4</sup> , мм/м	
		Исходная	После т.о. при 800°С		Исходная	После т.о. при 800°С
Ni-Mn-C						
№1	1,108	218,5	225,9	88	0,155	0,124
№2	2,138	130,0	130,4	75	0,177	0,147
Fe-Co-C						
№1	0,481	230,0	237,9	95	0,150	0,126
№2	0,637	179,0	177,2	80	0,165	0,137
Fe-Ni-C						
№1	0,331	414,2	434,1	97	0,129	0,096
№2	0,439	358,0	361,6	84	0,141	0,107

Из таблицы 3 следует, что оснащение бурового инструмента алмазами, предварительно подвергнутых термической обработке в инертной среде при температуре 800°С, снижает интенсивность его изнашивания от 17 до 26 %.

Таким образом, предварительная термическая обработка алмазов в инертной среде при температуре не выше 800°С нормализует внутренние напряжения в кристаллах алмазов, синтезированных в разных ростовых системах, и незначительно повышает их прочность, что приводит к снижению интенсивности изнашивания бурового инструмента.

#### Выводы:

Установлено, что после термической обработки на поверхности кристаллов алмаза выплавляются образования включений сплавов растворителей углерода. При этом в алмазах с большим содержанием включений эти образования появляются при более низких температурах.

Показано, что с увеличением температуры термической обработки в алмазах, синтезированных в ростовых системах Ni-Mn-C, Fe-Co-C и с Fe-Ni-C с высоким содержанием внутрикристаллических примесей и включений, наблюдается уменьшение прочности кристаллов алмаза во всем исследуемом диапазоне температур от 700 до 1100°С. При увеличении температуры термической обработки до 800°С в алмазах с меньшим содержанием внутрикристаллических примесей и включений за счет снижения внутренних напряжений в кристаллах происходит повышение их прочности.

Показано, что оснащение бурового инструмента алмазами, предварительно подвергнутыми термической обработке в инертной среде при температуре 800°С, способствует снижению его интенсивности изнашивания на 17 – 26 %.

#### Библиографический список

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: монография: в 6 т. / под общей ред. Н.В. Новикова. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2007. – Т. 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / под ред. А.А. Шепелева. – 2007. – 340 с.
2. Bovenkerk H.P. Morphology and physical characteristics of synthetic diamonds / H.P. Bovenkerk // Amer. Mineral. – 1961. – Vol. 46, N 7-8. – P. 952-963.
3. Влияние условий кристаллизации алмаза в системе карбид бора – углеродсодержащее вещество на содержание в нем примеси бора / [А. А. Шульженко, А.Н. Соколов, В.Г. Гаргин и др.] // Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология. – Москва, Троицк, 2012. – С. 458–462.
4. Физико-химические проблемы синтеза сверхтвердых материалов / [Г.А. Подзярей, Т.Н. Начальная, А.А. Шульженко и др.]. – Киев: ИСМ АН УССР, 1978. – С. 23–26.
5. Ильницкая Г.Д. Получение высококачественных алмазных шлифпорошков / Г.Д. Ильницкая, Г.П. Богатырева, Г.Ф. Невструев // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: сб. науч. тр.; ИСМ НАН Украины. – К., 2005. – С. 63–71.



6. Влияние скорости роста на свойства монокристаллов алмаза / [Н.В. Новиков, А.А. Шульженко, М.Я. Кацай и др.] // Сверхтвердые материалы. – 1984. – №3. – С. 15–18.
7. Природные и синтетические алмазы / [Г.Б. Бокий, Г.Н. Безруков, Ю.А. Ключев и др.]. – М.: Наука, 1986. – 222 с.
8. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализатор. – М: Мир, 1979. – 582 с.
9. Методика определения удельной магнитной восприимчивости порошков сверхтвердых материалов (СТМ): М88 Украины 90.256–2004. – К.: ИСМ НАН Украины, 2004. – 9 с.
10. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия: ДСТУ 3292–95. – [Введ. 01.01.96]. – К.: Госстандарт Украины, 1995. – 71 с.
11. Шлифпорошки синтетических алмазов марок АС200, АС250, АС300, АС350, АС400. Технические условия: ТУУ 28.4-05417344-2003. – [Введ. 01.09.03]. – К.: Госстандарт Украины, 2003. – 10 с.
12. Методика определения коэффициента термостабильности шлифпорошков синтетических алмазов: М. 26.8–299:2010. – К.: ИСМ НАН Украины, 2010. – 7 с.
13. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении / П.В. Зыбинский, Р.К. Богданов, А.П. Загора, А.М. Исонкин. – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – 244 с.

Надійшла до редакції 23.07.2013

А. Н. Исонкин, Г. Д. Ильницкая, В. Н. Ткач, I. М. Зайцева  
*Институт надтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины*

### Оцінка перспективності використання в буровому породоруйнівному інструменті синтетичних алмазів різних ростових систем

У статті представлені результати дослідження впливу термічної обробки алмазів на їх фізико-механічні характеристики і на зносостійкість бурового інструменту. Показано, що зі збільшенням температури термічної обробки алмазів, синтезованих в ростових системах Ni-Mn-C, Fe-Co-C і Fe-Ni-C з високим вмістом внутрішньокристалічних домішок і включень спостерігається зменшення міцності кристалів алмазу в усьому досліджуваному діапазоні температур від 700° С до 1100° С. При збільшенні температури до 800° С в алмазах з меншим вмістом внутрішньокристалічних домішок і включень відбувається незначне підвищення міцності за рахунок зниження внутрішніх напружень в кристалах алмазу. Оснащення бурового інструменту алмазами, попередньо підданими термічній обробці в інертному середовищі при температурі 800° С, сприяє зниженню його інтенсивності зношування на 17 – 26%.

Ключові слова: термічна обробка, буровий інструмент, внутрішньокристалічні домішки і включення, інтенсивність зношування, міцність.

A. N. Isonkin, G. D. Ilnitskaya, V. N. Tkach, I. N. Zaitseva  
*V.N. Bakul Institute of Superhard Materials, Ukraine*

### The prospects of using synthetic diamonds in drilling rock cutting tools

The paper provides the results of the research of the influence of thermal processing of diamonds on their physical-mechanical characteristics and on wear resistance of the drilling tool. It is shown that with the increase in temperature of thermal processing of the diamonds synthesized in systems Ni-Mn-C, Fe-Co-C, Fe-Ni-C with high content of intracrystal impurities and inclusions there is the reduction of diamond crystals strength from 700 up to 11000. With the increase in temperature up to 8000C in diamonds with smaller contents of intracrystal impurities and inclusions there is insignificant increase of strength due to the reduction of internal stresses in diamond crystals. The equipment of a drilling tool with diamonds subjected to thermal processing in the inert environment at temperature 8000 C reduces the intensity of wear process by 17 – 26 %.

Key words: thermal processing, drilling tool, intracrystal impurities and inclusions, intensity of wear process, strength.